第 37 卷第 14 期 2017 年 7 月 | 生 态 学 报 ACTA ECOLOGICA SINICA | Vol.37,No.14 Jul.,2017

DOI: 10.5846/stxb201604200743
张美存, 程田, 多立安, 赵树兰.微生物菌剂对草坪植物高羊茅生长与土壤酶活性的影响.生态学报,2017,37(14):4763-4769.
Zhang M C, Cheng T, Duo L A, Zhao S L.Effects of microbial agents on the growth of turfgrass *Festuca arundinacea* and soil enzyme activity.Acta Ecologica Sinica,2017,37(14):4763-4769.

微生物菌剂对草坪植物高羊茅生长与土壤酶活性的影响

张美存, 程 田, 多立安, 赵树兰*
天津市动植物抗性重点实验室, 天津师范大学生命科学学院, 天津 300387

摘要:从生活垃圾堆肥中分离出放线菌、枯草芽孢杆菌和苏云金芽孢杆菌,通过形态学和染色鉴定,分别以微生物单菌剂施入到草坪土壤基质中,研究了几种微生物菌剂对高羊茅生长与土壤酶活性的影响。结果表明:3 种微生物菌剂处理可以显著提高高羊茅株高、生物量和叶绿素含量($P<0.01$ 或 $P<0.05$),促进了高羊茅的生长。同时,施加不同的微生物菌剂对于土壤蔗糖酶、脲酶、过氧化氢酶、多酚氧化酶和过氧化物酶活性均有显著的增强作用,其中放线菌处理土壤脲酶和多酚氧化酶分别是对照的 8.38 倍和 20.6 倍。因此,从堆肥中得到的 3 种微生物菌剂均可有效提高土壤酶活性,改善植物根际微生态环境,提高了土壤肥力和养分的利用率,促进了草坪植物生长,改善草坪质量。该研究可为微生物菌剂在草坪建植体系中的应用提供依据。

关键词:生活垃圾堆肥;微生物菌剂;高羊茅;土壤酶活性

Effects of microbial agents on the growth of turfgrass *Festuca arundinacea* and soil enzyme activity

ZHANG Meicun, CHENG Tian, DUO Li'an, ZHAO Shulan*
Tianjin Key Laboratory of Animal and Plant Resistance, College of Life Sciences, Tianjin Normal University, Tianjin 300387, China

Abstract: Turfgrass plays a vital role in beautifying the environment, purifying the air, conserving soil and water, and providing recreation sites for people. However, turfgrass growth is limited by environmental factors and management conditions. It is well known that beneficial microbial agents can improve soil structure and nutrient status and enhance the activity of soil enzymes, thereby promoting plant growth. Three types of microbial communities, actinomycetes, *Bacillus subtilis*, and *Bacillus thuringiensis*, play a role in promoting plant growth. Municipal solid waste (MSW) compost consists of a rich variety of rapid succession microbial communities, the type and population size of which depend on the composition and content of organic matter in the compost and the interaction among the microorganisms. Microorganisms can be extracted from MSW compost and have a potentially broad application. In the present study, the aforementioned three types of microbial communities were extracted from compost, identified through morphological characteristics and staining, and then applied to a turfgrass medium. The effects of microbial agents on the growth of the turfgrass (*Festuca arundinacea*) and soil enzyme activity were investigated. The results indicated that each type of microbial agent significantly increased the plant height, biomass, and chlorophyll content of *F. arundinacea* compared to the controls. On day 30 of the investigation, plant heights were 21.9%, 18.7%, and 29.1% higher in actinomycetes-, *B. subtilis*-, and *B. thuringiensis*-inoculated plants than their controls, respectively. The aboveground fresh and dry weights of *F. arundinacea* inoculated with *B. subtilis* increased by 57.0% and 40.9%, respectively, compared to the control. A significant enhancement of 60.0% in belowground dry

基金项目:国家自然科学基金资助项目(31470548);天津市科技支撑计划重点项目(13ZCZDNC00200)
收稿日期:2016-04-20; **网络出版日期**:2017-03-02

*通讯作者 Corresponding author.E-mail: zhaosl_tjnu@126.com

weight was observed in plants inoculated with *B. thuringiensis*. The total chlorophyll contents of *F. arundinacea* inoculated with actinomycetes and *B. subtilis* increased by 52.3% and 36.6%, respectively, compared to their controls. Furthermore, application of microbial agents markedly stimulated the activities of soil enzymes. In soils inoculated with actinomycetes, *B. subtilis*, and *B. thuringiensis*, the urease activity increased by 8.38-, 2.77-, and 2.45-fold, respectively; the polyphenol oxidase activity increased by 20.6-, 7.7-, and 8.4-fold, respectively; and the peroxidase activity increased by 3.3-, 4.6-, and 4.3-fold, respectively, compared with their controls. On the basis of the results obtained, we conclude that the three types of microbial communities derived from the compost can effectively increase soil enzyme activities, improve the micro-ecosystem of the plant rhizosphere, and improve soil fertility and nutrient utilization, thereby promoting turfgrass growth and improving turf quality. This study can provide a basis for the utilization of microbial agents in turf establishment.

Key Words: municipal solid waste compost; microbial agents; *Festuca arundinacea*; soil enzyme activities

近年来,微生物菌剂被广泛用于改善土壤微生物环境,促进作物生长[1],放线菌、枯草芽孢杆菌和苏云金芽孢杆菌三类微生物均对植物生长起到促进作用。Zaidi 等研究显示,土壤接种 *Bacillus subtilis* SJ-101 可显著提高芥菜生物量,促进植物生长[2]。Moellenbeck 等认为,苏云金芽孢杆菌中的一种蛋白能杀死玉米根虫,对玉米的生长有显著促进作用[3]。放线菌对草莓根系生长和新根的生成有明显的促进作用[4]。

土壤酶是土壤有机质分解与养分转化和循环的驱动力,是土壤质量和生态稳定性的重要指标[5-7],土壤酶活性的高低能反映土壤生物活性和土壤生化反应强度,土壤过氧化氢酶、脲酶、蔗糖酶等关键酶的共同作用促进了作物的生长发育和根系活力的提高[8-9]。研究发现,接种微生物菌剂能够改善土壤结构和营养状况,调节土壤酶的活性,提高土壤肥力和养分利用率[10]。芽孢杆菌菌剂能够显著改善根际土壤微生态,提高土壤脲酶、蔗糖酶、蛋白酶、过氧化物酶和脱氢酶活性[11]。

草坪是城市建设的重要组成部分,其绿化面积及质量已成为评价城市环境质量的重要客观标准[12]。由于环境因素和管理条件的限制,草坪草的生长受到影响。因此,促进草坪草生长、提高其抗性研究将具有重要的现实意义。尽管接种微生物的效应研究报道较多,但将微生物应用于草坪体系的研究还鲜有报道。本研究将堆肥中分离得到的放线菌、枯草芽孢杆菌和苏云金芽孢杆菌,施入草坪土壤中,探索几种微生物菌剂对草坪植物的生长和土壤酶活性的影响,为堆肥微生物菌剂在草坪建植体系中的应用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 材料

供试菌株从生活垃圾堆肥中分离获取;供试草坪植物选用我国北方常见高羊茅(*Festuca arundinacea*);供试土壤为天津师范大学校内草坪土,取自 5—15 cm 表层土壤,土壤类型为潮土,质地为砂质粘土,其性质为:pH 7.44,有机质含量 46.8 g/kg,全氮 2.1 g/kg,全钾 45.61 g/kg,有效磷 22.03 mg/kg,饱和含水量 58%。土壤采集后,剔除植物残根等,过 2 mm 筛,备用。

1.2 方法

1.2.1 微生物菌剂的制备

采用稀释涂布法培养堆肥中的微生物[13],放线菌分离采用高氏一号固体培养基,细菌分离采用牛肉膏蛋白胨固体培养基,挑取菌落特征符合放线菌、枯草芽孢杆菌和苏云金芽孢杆菌的菌种进行分离,然后分别进行染色鉴定和生理生化实验鉴定。将分离出的菌种纯化培养两代,取纯化的菌种培养,绘制微生物的生长曲线(图 1),获得微生物生长至稳定期的时间。将纯化的菌种接入相应的液体培养基中,适温培养,分别得到放线菌、枯草芽孢杆菌和苏云金芽孢杆菌单一菌剂。利用显微镜直接计数法计算单位体积菌液中的活菌数。放线菌、枯草芽孢杆菌和苏云金芽孢杆菌每 ml 菌液中的活菌数分别为 2.9×10^9、2.29×10^9 CFU 和 1.75×10^9 CFU。

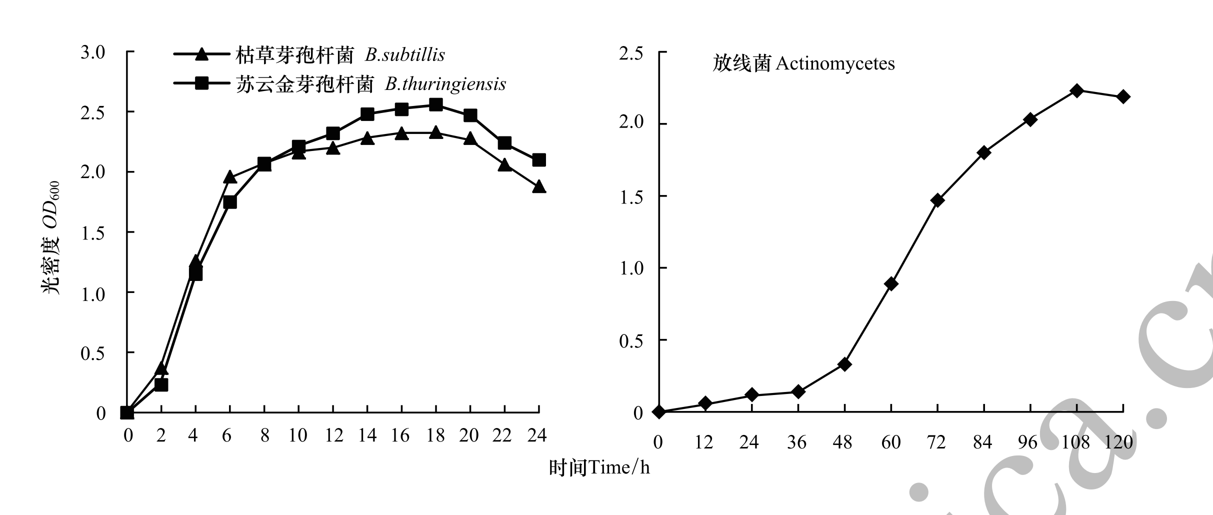


图 1　微生物生长曲线

Fig.1　Growth curves of microorganisms

1.2.2　盆栽实验

在直径为 7 cm(容积 0.3 L)的塑料盆中装入 250 g 供试土壤(容重为 1.14 g/cm^3),播种高羊茅草种 0.5 g。待高羊茅幼苗生长至约 5 cm 时,分别向草坪土壤中加入 1 mL 不同微生物菌剂,为避免液体培养基中的营养物质干扰,对照分别加入 1 mL 无菌液体培养基(放线菌培养基为高氏一号培养基,枯草芽孢杆菌和苏云金芽孢杆菌培养基均为牛肉膏蛋白胨培养基),每一处理 3 次重复。每天按需补充水分,使土壤含水量维持在田间持水量的 70%,以保证植物良好生长。植物培养在室温下进行,培养期间环境温度为 15—20 ℃,相对湿度为 40%—55%,光照为透入室内的自然光,经常调换盆栽位置,以保证光照一致。

1.3　指标测定

株高动态测定:接种菌剂后每隔 10 d 对每个处理测定 1 次株高,共测定 5 次,每个处理中随机选取 3 株长势匀称的植株,取其平均株高。

生物量的测定:草坪培植 70 d 后,将高羊茅齐根剪下,测定鲜重,然后将地上部分于 105 ℃条件下杀青 0.5 h,80 ℃烘干至恒重,称干重。根洗净,80 ℃烘干至恒重。

叶绿素含量测定:播种 70 d 后,高羊茅处于营养生长期,取 0.2 g 鲜叶片于研钵中,加少量石英砂及少许 80%丙酮,充分研磨,将匀浆转入 15 mL 离心管中,并用适量 80%丙酮洗涤钵体,一并转入离心管中,用 80%丙酮定容至 10 mL,4000 r/min 离心 10 min,取上清液,以 80%丙酮作为对照,分别测定 663 nm 和 645 nm 处的吸光度值,并计算叶绿素含量[14]。

高羊茅培植 70 d 后,采集土样,自然风干过 1 mm 筛,按照关松荫的方法测定土壤酶的活性[5]。其中,蔗糖酶采用硫代硫酸钠滴定法;脲酶测定采用比色法;过氧化氢酶测定采用高锰酸钾滴定法;多酚氧化酶测定采用邻苯三酚比色法;过氧化物酶测定采用邻苯三酚比色法。

1.4　数据分析

采用 Microsoft Excel 2003 和 SPSS 17.0 进行数据处理及统计分析,用独立样本 T 检验对数据进行显著性差异分析。

2　结果与分析

2.1　微生物菌剂对高羊茅株高及生物量的影响

不同微生物菌剂对高羊茅的株高均有显著促进作用(表 1)。在接种菌剂的 20 d 内,菌剂处理对高羊茅的株高没有明显的影响,但随着时间的推延,微生物菌剂对株高生长的促进作用开始显现,接种后 30 d,和不含菌剂的对照相比,放线菌和苏云金芽孢杆菌处理株高分别增加了 21.9%和 29.1%(P<0.01);枯草芽孢杆菌

处理增加了 18.7%(P<0.05)。接种后 50 d,3 种微生物菌剂处理高羊茅株高分别比对照增加了 16.9%、21.9%和 31.8%(P<0.01)。

表 1 微生物菌剂对高羊茅生物株高和生物量的影响

Table 1 Effects of microbial agents on plant height and biomass of *F. arundinacea*

处理 Treatments	株高 Plant height/cm					地下干重 Root DW/(g/盆)	地上鲜重 Shoot FW/(g/盆)	地上干重 Shoot DW/(g/盆)
	10 d	20 d	30 d	40 d	50 d			
放线菌 Actinomycetes	9.50±0.79	17.70±0.75	20.58±0.35 **	23.62±0.51 **	24.68±0.49 **	0.39±0.03 *	3.64±0.12 **	0.59±0.03
对照 Control	9.06±0.33	14.48±1.13	16.88±0.61	20.21±0.23	21.12±0.42	0.27±0.03	2.41±0.20	0.49±0.02
枯草芽孢杆菌 *B. subtillis*	9.16±0.52	16.74±0.92	20.43±0.79 *	23.96±0.12 **	25.28±0.33 **	0.39±0.03	3.69±0.13 **	0.62±0.02 **
对照 Control	8.67±0.45	13.90±0.60	17.21±0.12	19.84±0.38	20.73±0.48	0.25±0.05	2.35±0.21	0.44±0.03
苏云金芽孢杆菌 *B. thuringiensis*	9.16±0.20	15.79±0.57	22.21±0.96 **	26.38±0.68 **	27.32±0.61 **	0.40±0.01 *	3.01±0.13	0.58±0.01 **
对照 Control	8.67±0.45	13.90±0.60	17.21±0.12	19.84±0.38	20.73±0.48	0.25±0.05	2.35±0.21	0.44±0.03

注:* 和 ** 表示菌剂处理与对照之间的差异;* P < 0.05, ** P < 0.01

与对照相比,微生物菌剂处理的高羊茅地下干重、地上鲜重和地上干重均有显著的增加(表 1)。放线菌菌剂处理地下干重、地上鲜重分别比对照增加了 44.4%(P<0.05)、51.0%(P<0.01);枯草芽孢杆菌处理地上鲜重和干重分别增加了 57.0%和 40.9%(P<0.01);而苏云金芽孢杆菌处理地下干重、地上干重分别比对照增加了 60.0%(P<0.05)和 31.8%(P<0.01)。

2.2 微生物菌剂对高羊茅叶绿素含量的影响

放线菌和枯草芽孢杆菌对高羊茅叶绿素 a 和总叶绿素含量的提高均有显著作用(表 2),而对叶绿素 b 含量增加没有明显的促进作用(P >0.05)。接种放线菌、枯草芽孢杆菌后,叶绿素 a 的含量分别比对照增加了 67.2%(P <0.01)、39.7%(P <0.05),总叶绿素含量则分别比对照增加了 52.3%(P <0.01)、36.6%(P <0.05)。接种放线菌菌剂对叶绿素 a 和总叶绿素含量的促进作用最大,而苏云金芽孢杆菌对高羊茅叶绿素含量无显著影响(P >0.05)。

表 2 不同微生物菌剂对高羊茅叶绿素含量的影响

Table 2 Effect of microbial agents on chlorophyll contents of *F. arundinacea* / (mg/g FW)

处理 Treatments	叶绿素 a Chlorophyll a	叶绿素 b Chlorophyll b	总叶绿素 Total chlorophyll
放线菌 Actinomycetes	1.94±0.03 **	0.68±0.10	2.62±0.09 **
对照 Control	1.16±0.10	0.56±0.04	1.72±0.14
枯草芽孢杆菌 *B. subtillis*	1.90±0.04 *	0.86±0.03	2.76±0.03 *
对照 Control	1.36±0.15	0.66±0.07	2.02±0.21
苏云金芽孢杆菌 *B. thuringiensis*	1.72±0.07	0.81±0.03	2.52±0.10
对照 Control	1.36±0.15	0.66±0.07	2.02±0.21

2.3 微生物菌剂对土壤酶活性的影响

微生物菌剂对土壤酶活性均有不同程度的促进作用(图 2)。由图 2 可知,放线菌处理的土壤蔗糖酶活性显著高于对照,是对照的 2.10 倍(P <0.05)。微生物菌剂处理的土壤脲酶活性显著高于对照(图 2),尤其是放线菌处理,其脲酶活性是对照的 8.38 倍(P <0.05),而加入枯草芽孢杆菌和苏云金芽孢杆菌的处理,土壤脲酶活性与对照相比也有显著增加,分别是对照的 2.77(P <0.01)和 2.45 倍(P <0.05)。由图 2 可知,放线菌、枯草芽孢杆菌和苏云金芽孢杆菌处理,土壤过氧化氢酶活性均显著高于对照,分别是对照的 1.91(P <0.05)、1.85(P <0.01)和 1.40 倍(P <0.05)。3 种微生物菌剂处理的多酚氧化酶活性,分别是对照的 20.6(P <0.01)、

7.7(P <0.05)和 8.4 倍(P <0.01;图 2);由图 2e 可知,微生物菌剂对土壤过氧化物酶活性的增加有明显的促进作用,3 菌剂处理的过氧化物酶活性分别是对照的 3.3、4.6 和 4.3 倍(P <0.05)。这说明加入微生物在一定程度上加速了土壤腐质化程度,促进了土壤酶活性的提高。

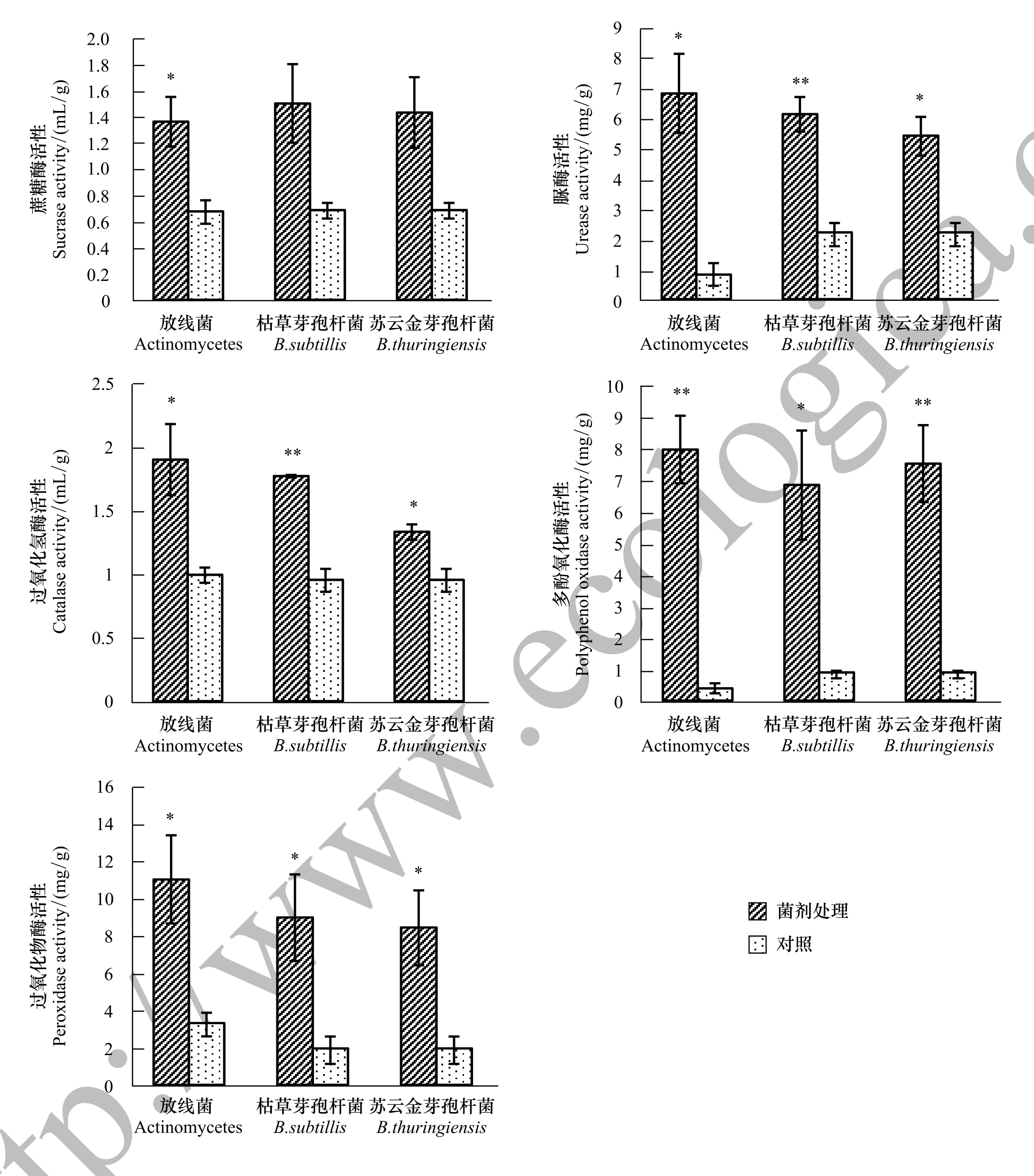


图 2　微生物菌剂对土壤酶活性的影响

Fig.2　Effects of microbial agents on soil enzyme activities

3　讨论

土壤酶主要来源于土壤微生物、土壤动物、植物根系和残体,它是土壤有机体的代谢动力,参与土壤发生与发育以及土壤肥力的形成等过程[15]。土壤酶活性高低可以代表土壤中物质代谢的旺盛程度,是土壤肥力的一个重要指标[16]。本研究从垃圾堆肥中获得放线菌、枯草芽孢杆菌和苏云金芽孢杆菌,分别加入草坪土壤基质中,发现 3 种微生物菌剂均显著提高了土壤脲酶、蔗糖酶、过氧化氢酶、多酚氧化酶和过氧化物酶活性,而放线菌对于土壤蔗糖酶、脲酶和多酚氧化酶活性的提高要强于另两种菌剂。这可能因为放线菌自身能够产生

大量的抗生素和胞外酶,对土壤有机物的分解及土壤腐殖质合成起着重要作用, 同时放线菌的次生代谢产物能够改善土壤环境[17]。而枯草芽孢杆菌和苏云金芽孢杆菌在生长代谢中能够产生酶类,具有抗菌活性和抗逆能力[18-20]。闫海霞等研究发现,枯草芽孢杆菌 FZB42 菌株显著提高了黄瓜根际脱氢酶、脲酶、多酚氧化酶、过氧化氢酶、过氧化物酶和碱性磷酸酶活性[21]。微生物菌剂的施加能显著增加土壤关键酶的活性,主要因为微生物菌剂能加速有机化合物的分解,提供了酶促反应的底物,从而促进了微生物的生长,而土壤酶是土壤中微生物生长代谢的产物[22]。涂璇等研究表明,供试放线菌能明显改变辣椒根内和根外不同部位土壤中细菌、真菌、放线菌的数量,并且呈现增大的趋势[23]。枯草芽孢杆菌 Tpb55 菌株在烟草根际土壤施用 50 d 后土壤中细菌多样性和丰富度均有所提高[24]。由于土壤酶在进行酶促反应时具有专一性,3 种微生物菌剂对各种酶的影响也有所不同。

施加放线菌、枯草芽孢杆菌和苏云金芽孢杆菌菌剂,对高羊茅的生长有明显的促进作用,与对照相比,株高、生物量和叶绿素含量都有显著的增加。这与雷先德等添加 *Paenibacillus mucilaginosus* 和 *Bacillus subtilis* 的复合微生物菌剂促进了菠菜营养生长的研究结果相一致[25],认为微生物菌剂的有益菌群在土壤中定殖后,分泌有机酸可以溶解释放出被土壤颗粒等吸附的 N、P、K 养分, 从而延长了土壤 N、P、K 养分的有效供给, 促进了菠菜营养生长。朱金峰等的研究也表明,施用微生物菌剂处理能显著提高烤烟根系活力和促进植物生长,认为微生物菌剂的加入能丰富土壤微生物的多样性,促进营养元素转化,改善和提高土壤肥力状况[9]。研究证明,许多的芽孢杆菌具有促生作用,它们可以将物质转化为植物所需的营养成分;或产生多种生理活性物质刺激调节植物生长;或通过刺激土壤中某些生理功能微生物的繁殖,增强土壤肥力,使植物处于良好的生长状态[11,26]。另一方面,施加 3 种微生物菌剂对高羊茅生长的促进作用,也与加入微生物菌剂后土壤酶活性的增强有关。土壤中氮、磷、钾等营养元素的形态和含量都与土壤酶活性变化有关,土壤酶活性增强与土壤养分含量的提高有密切联系[27]。土壤蔗糖酶将蔗糖水解成葡萄糖和果糖,成为植物和微生物重要的营养来源[28];脲酶活性反映土壤有机态氮向有效态氮的转化能力和土壤无机氮的供应能力[22];过氧化氢酶参与生物的呼吸代谢,消除过氧化氢,其活性与好氧微生物数量、土壤肥力有密切联系[28];多酚氧化酶可促进土壤腐殖质的合成和有机碳的累积[29];过氧化物酶活性表征土壤腐殖质化强度大小和有机质转化速度[30]。3 种微生物菌剂施用后,均增强了土壤酶活性,使土壤中的氮、磷、钾养分经酶的作用更容易被高羊茅所吸收,提供了良好的土壤生态环境,从而促进了高羊茅的生长。

4 结论

从堆肥中分离出的放线菌、枯草芽孢杆菌和苏云金芽孢杆菌施入草坪基质中,能够通过改善和平衡微生物群体结构,调节土壤酶活性,改善土壤生态环境,提高土壤肥力和养分利用率,促进了草坪植物的生长。但值得注意的是,本实验只选用了一个菌剂用量,适宜的菌剂用量对草坪植物的生长至关重要,如若将这几种微生物菌剂应用于草坪的田间种植体系中,菌剂用量问题还需进一步研究。同时,菌剂的施入对土壤微生物区系的生态效应也需进一步研究,从而为更好地应用微生物菌剂于草坪建植体系提供依据。

参考文献(References):

[1] 赵青云, 赵秋芳, 王辉, 王华, 庄辉发, 朱自慧. 根际促生菌 *Bacillus subtilis* Y-IVI 在香草兰上的应用效果研究. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(2): 535-540.

[2] Zaidi S, Usmani S, Singh B R, Musarrat J. Significance of *Bacillus subtilis* strain SJ-101 as a bioinoculant for concurrent plant growth promotion and nickel accumulation in *Brassica juncea*. Chemosphere, 2006, 64(6): 991-997.

[3] Moellenbeck D J, Peters M L, Bing J W, Rouse J R, Higgins L S, Sims L, Nevshemal T, Marshall L, Ellis R T, Bystrak P G, Lang B A, Stewart J L, Kouba K, Sondag V, Gustafson V, Nour K, Xu D P, Swenson J, Zhang J, Czapla T, Schwab G, Jayne S, Stockhoff B A, Narva K, Schnepf H E, Stelman S J, Poutre C, Koziel M, Duck N. Insecticidal proteins from *Bacillus thuringiensis* protect corn from corn rootworms. Nature Biotechnology, 2001, 19(7): 668-672.

[4] 毛宁, 薛泉宏, 唐明, 王玲娜, 赵娟, 段春梅. 放线菌对对羟基苯甲酸的降解作用及草莓生长的影响. 中国农业科技导报, 2010, 12(5):

103-108.

[5] 关松荫. 土壤酶及其研究法. 北京: 农业出版社, 1986: 274-340.

[6] DeForest J L. The influence of time, storage temperature, and substrate age on potential soil enzyme activity in acidic forest soils using MUB-linked substrates and L-DOPA. Soil Biology and Biochemistry, 2009, 41(6): 1180-1186.

[7] Roldán A, Salinas-García J R, Alguacil M M, Díaz E, Caravaca F. Soil enzyme activities suggest advantages of conservation tillage practices in sorghum cultivation under subtropical conditions. Geoderma, 2005, 129(3/4): 178-185.

[8] 李勇. 试论土壤酶活性与土壤肥力. 土壤通报, 1989, (4): 190-193.

[9] 朱金峰, 王小东, 郭传滨, 李友军, 井雪峰, 刘领, 崔珍珍. 施用微生物菌剂对土壤关键酶活性和烤烟根系生长的影响. 江西农业学报, 2015, 27(9): 31-35.

[10] 白红娟, 肖根林, 贾万利, 杨斌盛. 光合细菌提高污染土壤中酶活性的研究. 工业安全与环保, 2011, 37(6): 13-15.

[11] 任旭琴, 潘国庆, 彭莉, 徐旭, 马君洋, 何晶. 芽孢杆菌菌剂对淮安红椒连作土壤养分和酶活性的影响. 安徽农业大学学报, 2016, 43(2): 239-243.

[12] 多立安, 赵树兰, 高玉葆. 草坪建植体系构建中的生态问题. 生态学报, 2007, 27(3): 1065-1071.

[13] 赵斌, 何绍江. 微生物学实验. 北京: 科学出版社, 2002.

[14] 高俊凤. 植物生理学实验指导. 北京: 高等教育出版社, 2006.

[15] Bandick A K, Dick R P. Field management effects on soil enzyme activities. Soil Biology and Biochemistry, 1999, 31(11): 1471-1479.

[16] 邱莉萍, 刘军, 王益权, 孙慧敏, 和文祥. 土壤酶活性与土壤肥力的关系研究. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(3): 277-280.

[17] 周永强, 薛泉宏, 杨斌, 张晓鹿, 许英俊, 郭志英, 林超峰. 生防放线菌对西瓜根域微生态的调整效应. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2008, 36(4): 143-150.

[18] 黄曦, 许兰兰, 黄荣韶, 黄庶识. 枯草芽孢杆菌在抑制植物病原菌中的研究进展. 生物技术通报, 2010, (1): 24-29.

[19] Obagwu J, Korsten L. Integrated control of citrus green and blue molds using *Bacillus subtilis* in combination with sodium bicarbonate or hot water. Postharvest Biology and Technology, 2003, 28(1): 187-194.

[20] 王利平, 代林远, 李鹏. 苏云金芽孢杆菌研究进展. 中国畜牧兽医, 2011, 38(9): 224-227.

[21] 闫海霞, 郭世荣, 刘伟. 枯草芽孢杆菌对盐胁迫条件下黄瓜根际酶活性的影响. 华北农学报, 2010, 25(4): 209-212.

[22] 解媛媛, 谷洁, 高华, 张社奇, 夏雪, 刘磊, 郭星亮. 微生物菌剂酶制剂化肥不同配比对秸秆还田后土壤酶活性的影响. 水土保持研究, 2010, 17(2): 233-238.

[23] 涂璇, 薛泉宏, 张宁燕, 牛晓磊. 辣椒疫病生防放线菌筛选及其对辣椒根系微生物区系的影响. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2007, 35(6): 141-146.

[24] 游偲, 张立猛, 计思贵, 高加明, 张成省, 孔凡玉. 枯草芽孢杆菌菌剂对烟草根际土壤细菌群落的影响. 应用生态学报, 2014, 25(11): 3323-3330.

[25] 雷先德, 李金文, 徐秀玲, 张翰林, 曹林奎. 微生物菌剂对菠菜生长特性及土壤微生物多样性的影响. 中国生态农业学报, 2012, 20(4): 488-494.

[26] 张霞, 唐文华, 张力群. 枯草芽孢杆菌 B931 防治植物病害和促进植物生长的作用. 作物学报, 2007, 33(2): 236-241.

[27] Zantua M I, Dumenil L C, Bremner J M. Relationships between soil urease activity and other soil properties. Soil Science Society of America Journal, 1977, 41(2): 350-352.

[28] 黄继川, 彭智平, 于俊红, 林志军, 杨林香. 施用玉米秸秆堆肥对盆栽芥菜土壤酶活性和微生物的影响. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(2): 348-353.

[29] 郝建朝, 吴沿友, 连宾, 吴春笃. 土壤多酚氧化酶性质研究及意义. 土壤通报, 2006, 37(3): 470-474.

[30] 刘善江, 夏雪, 陈桂梅, 卯丹, 车升国, 李亚星. 土壤酶的研究进展. 中国农学通报, 2011, 27(21): 1-7.